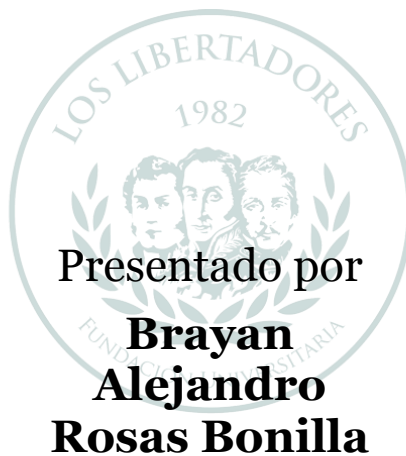

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TÉCNICA DE VISUALIZACIÓN DE FLUIDOS DE ALTA VELOCIDAD SCHLIEREN TIPO-Z



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería y Ciencias Básicas

Programa de ingeniería Aeronáutica

Bogotá D.C, Colombia

2018

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TÉCNICA DE VISUALIZACIÓN DE FLUIDOS DE ALTA VELOCIDAD SCHLIEREN TIPO Z

Presentado por

Brayan Alejandro Rosas Bonilla

En cumplimiento parcial de los requerimientos para optar

Título de

Ingeniero Aeronáutico

Dirigida por

Msc. Iván Felipe Rodríguez Barón

Codirector

Msc. Jaime Enrique Orduy

Presentada a

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Fundación Universitaria Los

Libertadores Bogotá D.C, Colombia.

2018

Notas de aceptación



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá DC, septiembre de 2018.



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores y a los resultados de su trabajo.

Dedicatoria



A mi Padre:

Gabriel Rosas Pérez

Por el apoyo y el sacrificio de todos estos años para sacarme adelante, y formarme un profesional y sobre todo una buena persona.

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

A mi Madre:

Carmenza Bonilla Pérez

Por el amor y acompañamiento en cada uno de mis pasos, desde el primer día de colegio hasta el último día de universidad, por su apoyo y por todos los sacrificios que realizo este proyecto va dedicado a mi madre.

A mis compañeros:

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Por el acompañamiento en cada uno de los espacios académicos por el apoyo a llevar a cabo este proyecto y culminar el plan de estudios.

A mis Docentes:

Facultad de ingeniería y ciencias básicas

Por transmitirme los conocimientos esenciales para la vida profesional como ingeniero, por su paciencia y por estar siempre dispuestos a enseñarme.

Agradecimientos



Agradecimiento a:

Msc. Francisco Javier González Cruz,
Msc. Iván Felipe Rodríguez Barón,
Msc. Jaime Enrique Orduy Rodríguez,
Dr. Jorge Luis Nispenuza Toledo

Por su apoyo y orientación en este proyecto, su paciencia y colaboración poniendo en práctica sus conocimientos en el transcurso del desarrollo de este proyecto.

Índice general

1	Introducción	1
2	Planteamiento del Problema.....	3
2.1.1	Objetivos.....	4
2.1.2	Objetivo General.....	4
2.2	Objetivos Específicos.....	4
2.3	Justificación.....	5
3	Marco Teórico.....	6
3.1	Schlieren.....	6
3.1.1	Historia de la técnica schlieren	7
3.1.2	Tipos De Montajes De Schlieren	8
3.1.3	Comparación de montajes schlieren.....	10
3.1.4	Selección del montaje schlieren optimo.....	11
3.2	Diseño de técnica schlieren Tipo-Z.....	12
3.2.1	Montaje Schlieren Tipo-Z.....	12
3.2.2	Cálculos matemáticos para el montaje Tipo-Z.....	13
3.2.3	Diseño de componentes de schlieren Tipo-Z.....	17
4	Metodología aplicada.....	21
4.1	Tipo De Metodología.....	21
4.2	Etapas De La Metodología.....	21
4.2.1	Etapa 1: Recolección De Documentación.....	21
4.2.2	Etapa 2: Análisis De Documentos.....	21
4.2.3	Etapa 3: Recogida Y Análisis De Datos.....	22
4.2.4	Etapa 4: Desarrollo y construcción del montaje.....	22
4.2.5	Etapa 5: Realización De Pruebas.....	22
4.2.6	4.2.6. Etapa 6: Elaboración de conclusiones.....	22
5	Análisis y Resultados.....	25
5.1	Construcción schlieren tipo-z en laboratorio de la fundación universitaria los libertadores	25
5.2	Resultados obtenidos del comportamiento de la candela con una vela en la zona de pruebas.....	26
5.3	Resultados obtenidos del comportamiento de la candela con un encendedor en la zona de pruebas.....	28

6 Conclusiones y Recomendaciones25

Bibliografía.....27

Apéndice A Primer Apéndice.....29

Índice de figuras

1. Fotografía schlieren.	6
2. Arreglo de Toepler.....	7
3. Schlieren Tipo-Z.....	8
4. Schlieren tipo- Background.....	9
5. Schlieren tipo- Rainbow Schlieren o schlieren de color.....	10
6. Distribución Schlieren Tipo-Z.....	11
7. variables espejo cóncavo.....	14
8. Medidas Montaje Schlieren.....	16
9. espejo cóncavo.....	17
10. base para espejo.....	18
11. base para cuchilla.....	18
12. Haz de luz.....	19
13. Cámara de video Canon.....	19
14. Mesa de trabajo.....	20
15. Configuración schlieren tipo-Z.....	20
16. Construcción técnica schlieren.....	25
17. Espejo colimado.....	26
18. Comparación gradiente de densidad con vela.....	26
19. schlieren con vela.....	27
20. comparación gradiente de densidad con encendedor.....	28
21. schlieren con encendedor.....	29

Índice de Tablas

1. Ventajas y desventajas configuración schlieren.....	10
2. Ponderación de los sistemas schlieren.....	11

Abreviaturas

Aberración Cromática: Fenómeno producido por la diferencia en la longitud de onda de los rayos de luz que llegan a un mismo punto.

CAD: acrónimo de Computational Assist Design que traduce Diseño asistido por Computadora.

CFD: acrónimo de Computational Fluid Dynamics que traduce Dinámica de Fluidos por Computadora.

Capa Límite: capa límite se define como la zona entre un fluido y una superficie donde el movimiento se perturba; en esta la velocidad del fluido va desde cero. (contacto con la superficie) hasta 99% (el punto más lejano).

Gradiente: Razón de cambio de una magnitud.

Flujo Conectivo: Circulación de la masa de un fluido durante un proceso de transferencia de calor por convección, de importancia en sistemas pasivos de refrigeración de reactores de agua ligera.

Flujo Subsónico: Flujos con velocidades por debajo de la del sonido $Mach < 1$.

Flujo Transónico: Flujos con velocidades cercanas a la del sonido $Mach = 1$.

Flujo Sónico: Flujos con velocidades igual a la del sonido $Mach = 1$

Flujo Supersónico: Flujos con velocidades mayores que la del sonido $Mach > 1$

Flujo Hipersónico: Flujo con velocidades muy superiores a la del sonido $Mach > 4; 5$.

LED SMD: Diodo emisor de luz el cual está montado sobre la superficie de una placa de circuito impreso y encapsulado en una resina semirrígida.

Luz Colimada: Fenómeno en el cual los rayos de luz que provienen de una misma fuente son paralelos los unos con los otros.

Schlieren: Técnica de visualización que permite apreciar las variaciones en el gradiente de densidad producto de un cambio de temperatura o velocidad.

Variables:

f = Distancia focal

d = Diametro del espejo

e = ESpesor

C = Centro del foco

F = Foco

R = radio de curvatura del espejo

p = distancia del objeto al espejo

q = distancia de la imagen a la espejo

I = Tamaño de la imagen

O = Tamaño del objeto

n = diámetro focal

Δf = Astigmatismo

Alfabeto griego

θ = angulos

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TÉCNICA DE VISUALIZACIÓN DE FLUIDOS DE ALTA VELOCIDAD SCHLIEREN TIPO-Z

Resumen

En este proyecto fue realizada la técnica de schlieren, la cual consiste en un sistema óptico para observar el cambio del gradiente de densidad de un fluido que actúa sobre un cuerpo a partir de la refracción de luz producida por una fuente de luz puntual incidiendo sobre los espejos cóncavos, en este caso se diseñó y construyó la técnica de schlieren tipo-z, esta técnica consta de la configuración de dos espejos ubicados a un Angulo de incidencia, referente al haz de luz y la cámara formando la letra Z, esta técnica es la más óptima para la observación de fenómenos aerodinámicos y ópticos que se pueden estudiar dentro de los programas y grupos de investigación en la Fundación Universitaria Los Libertadores.

Se diseña y se construye cada una de las piezas y componentes de la técnica, primero haciendo el diseño de los componentes en el software CATIA para después proceder a la construcción de los elementos fabricándolos en acero ASTM 36, esto con el fin de garantizar la efectividad y precisión al fijar los espejos, para la construcción de estos primero se necesitó estudiar y aplicar técnicas de ópticas como la refracción y la teoría de espejos parabólico, con estas teoría se seleccionaron los espejos y se obtuvieron las dimensiones de los componentes como las distancias de ubicación y los ángulos de incidencia para la realización del montaje.

Este proyecto tiene como propósito fundamental la construcción de la técnica schlieren tipo-z, en la Fundación Universitaria Los Libertadores para el desarrollo de laboratorios e investigaciones en los espacios académicos de los programas de ingeniería en las teorías de aerodinámica supersónica, óptica y transferencia de calor donde se pueden observar fenómenos de variación de densidad en un fluido ocasionada por fenómenos de alta temperatura o presión.

Finalmente, el fenómeno observado para la prueba del sistema es comparado con resultados obtenidos en otras investigaciones documentadas en la literatura científica,.

Palabras claves: Schlieren, tipo-z, haz de luz, óptica, espejos parabólicos, gradiente.

Capítulo 1

Introducción

El presente diseño y construcción de la técnica de visualización *schlieren* tipo-z se refiere a la aplicación de la técnica en los laboratorios de aerodinámica en la Fundación Universitaria Los Libertadores con la cual se puede observar el comportamiento de un fluido sobre un cuerpo que viaja a altas velocidades , como los fenómenos que se forma cuando cambia su gradiente de densidad , esto con el fin de facilitar la investigación y el desarrollo de proyectos de investigación en el campo aeroespacial.

La técnica de *schlieren* se aplicó por primera vez por Hooke en Alemania a principios del siglo XVII quien la utilizaba para la investigación de la dinámica de gases en el aire probando con la llama de una vela y el aire que circundaba sobre ella, hasta el siglo XVIII la técnica no tuvo ningún avance notable, durante este periodo la técnica se limitó a la observación de estrías o venas dentro de los componentes ópticos; fue a finales de este siglo y a comienzos del siglo XIX cuando Christian Huygens implemento la utilización de espejos dentro de la técnica y estableció los principios fundamentales de esta. Durante el transcurso del siglo XX fue cuando gracias a las investigaciones de personajes como Robert W. Wood, Carl Cranz, Hubert Schardin, Rudolf Hermann, Douglas W. Holder y R.J. North que la técnica encontró su camino en la investigación aeronáutica, que desde un inicio gracias a las investigaciones de Einst Mach en el campo de la balística del siglo anterior, se desarrolló en el ámbito de la aerodinámica transónica y supersónica. [1]

La construcción de la técnica de *schlieren* en la Fundación Universitaria Los Libertadores se basa en la investigación, como la realización de prácticas de laboratorio del espacio académico aerodinámica supersónica, teniendo en cuenta que esta técnica ha sido altamente utilizada en diferentes partes del mundo para la investigación del comportamiento de un flujo transónico, supersónico e hipersónico sobre un objeto o un cuerpo fuselado en el caso de la aviación. De igual manera se realiza una comparación de los resultados con investigaciones realizadas y documentas en la literatura científica.

La aplicación de esta técnica no está limitada solamente a fenómenos aerodinámicos ya que está también ha sido ampliamente utilizada en aplicaciones de transferencia de calor y algunos casos también en aplicación de flujos supersónicos, como diferentes comportamientos de densidades. En Colombia la investigación del comportamiento de flujos supersónicos mediante la técnica de *schlieren* han sido muy pocas y ninguna aplicando la

técnica tipo-z para la investigación en aeronáutica o aeroespacial, como también ninguna institución de educación superior ha incursionado sobre esta técnica, siendo pioneros.

En la actualidad la técnica de *schlieren* está siendo aplicada a los fenómenos y observación del comportamiento geodinámico de fluidos que viajan a través de una tobera, de igual manera está siendo utilizada la técnica tipo-z para estudiar el comportamiento de los diferentes tipos de ondas de choque que se generan en vehículos y cuerpos fuselados que viajan a velocidades supersónicas y transónicas, sin dejar atrás el desarrollo que tiene esta técnica en la industria militar, como lo es en balística, misiles, aeronaves militares y vehículos aéreos no tripulados que superan la velocidad del sonido. También es aplicada en fenómenos de transferencia de calor para visualizar el comportamiento de fenómenos de densidad como el cambio de su gradiente.

En contexto la finalidad de este proyecto es netamente la implementación de la técnica *schlieren* tipo-z en los laboratorios propuesto por el profesor para el espacio académico, aerodinámica supersónica para el estudio e investigación de los fenómenos que se presenta sobre un objeto o cuerpo fuselado que viaja a velocidades mayores a mach 1, como también el estudio de transferencia de calor y gasodinámico de un flujo que viaja dentro de una tobera. Adicionalmente mejorar la investigación en el ámbito aeroespacial y semilleros de investigación en el campo aerodinámico.

Esta investigación está dividida en secciones como lo es el marco referencial, donde se plasman los textos principales utilizados para esta investigación con sus respectivas citas según la norma fundamental, un montaje experimental donde se encontraran los planos y diseños del montaje como su listado de materiales y despieces del experimento, también las pruebas a realizarse su aplicabilidad y la correcta utilización de este, en seguida se encuentra la respectiva comparación de los resultados obtenidos en el laboratorio, con investigaciones realizadas y de esta forma se obtienen las conclusiones finales de los resultados.

Este proyecto de grado está centrado en el desarrollo y diseño de la técnica *schlieren* tipo- z, posteriormente su construcción y aplicación en los laboratorios de la Fundación Universitaria Los Libertadores involucrando los elementos necesarios para la construcción como lo son los lentes, los espejos, la cámara , el haz de luz colimada para garantizar la veracidad de los datos obtenidos por la fotointerpretación de las imágenes captadas por la cámara durante el desarrollo del experimento en el fenómeno analizado.

Capítulo 2

Planteamiento del Problema

La dinámica de fluidos requiere técnicas de visualización que permitan un claro reconocimiento y comportamiento de un flujo de corriente circundante sobre una superficie, que está sometida a velocidad y propiedades determinadas del fluido, para la comprensión y medición del comportamiento y dichas propiedades, se requiere implementar técnicas para visualización de fluidos, la universidad cuenta con un laboratorio experimental para realizar pruebas aerodinámicas, el cual cuenta con un túnel de viento de circuito abierto, y la visualización del comportamiento del fluido sobre una superficie se realiza mediante la aplicación de humo en la cámara de prueba, los experimentos son realizados a velocidades subsónicas de baja velocidad ($M < 0.3$), considerado un fluido incompresible y por lo tanto la variación de su densidad en cualquier punto no es representativa. Sin embargo, al incrementar la velocidad ($M > 0.3$) y considerar un fluido compresible, la variación de la densidad entre una corriente de fluido libre y un fluido perturbado es muy alta, produciendo cambios significativos en las propiedades del mismo, teniendo en cuenta que las aeronaves de transporte de carga y pasajeros normalmente avanzan en velocidad crucero aproximadamente hasta $M = 0.85$, y que aeronaves con misiones aeroespaciales alcanzan velocidades supersónicas ($M > 1$) hasta velocidades orbitales (aproximadamente $M = 26$), se hace necesario el estudio del comportamiento y visualización de estos fluidos la cual se realiza por medio de la técnica de visualización de flujos alta velocidad *schlieren*, que permite profundizar en los análisis del comportamiento del flujo cercanos al elemento de prueba.

La implementación de la técnica *schlieren* es muy importante en el ámbito de ingeniería aeronáutica como aeroespacial, como un estudio aerodinámico de fluidos subsónicos como supersónicos.

De este problema nace la siguiente pregunta ¿qué técnica de visualización se debe implementar para visualizar el comportamiento en un fluido basado en la variación de densidad?

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo General

Diseño y construcción del sistema de visualización *schlieren* en Z para la visualización del comportamiento de un fluido basado en la variación de densidad, para ser implementado en el laboratorio de espacios académicos del programa de Ingeniería Aeronáutica de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Calcular matemáticamente las dimensiones necesarias para implementar en la técnica *schlieren*
- Elaboración de los planos en un software CAD (Catia) para la construcción de esta técnica
- Construcción del montaje del sistema para la realización de pruebas de visualización
- obtener imágenes de alta calidad, donde se pueda visualizar el comportamiento del fluido basado en la variación de densidad.
- Comparar los resultados obtenidos con investigaciones documentadas en la literatura científica.

2.2 Justificación

Dentro de los estudios de ingeniería aeronáutica, e Ingeniería aeroespacial, como en el contexto del estudio aerodinámico subsónico y supersónico es necesario conocer el comportamiento que un fluido actuando sobre un cuerpo a diferentes velocidades, en la institución contamos con un laboratorio y un túnel de viento, en el cual son realizadas pruebas para un flujo sobre una superficie a velocidades subsónicas, pero en la universidad nace la necesidad de hacer pruebas a velocidades supersónicas ya que dentro del programa académico se tiene el espacio académico de aerodinámica supersónica y sistemas de propulsión espacial, y mediante la implementación de esta técnica es posible visualizar el comportamiento de un flujo supersónico sobre una superficie; de la misma forma permite establecer estudios a ciertas condiciones aerodinámicas de diferentes modelos de pruebas utilizados para el desarrollo de diferentes espacios académicos o semilleros que llevan a cabo diferentes proyectos y/o investigaciones aerodinámicas realizadas en la fundación universitaria los libertadores.

En el contexto del estudio aerodinámico sobre el comportamiento de un flujo sobre una superficie, se pueden establecer bajo condiciones teorico-analíticas que mediante ecuaciones preestablecidas dan como resultado variables y coeficientes que por medio de un software CFD como ANSYS FLUENT, es posible hacer simulaciones de cómo se comporta un fluido, que se construye bajo condiciones de frontera establecidas por ecuaciones según lo requiera el problema, estos modelos experimentales generan estudios cercanos a la realidad, pero pueden estar limitados sobre ciertos parámetros. El método de visualización de fluidos *schlieren* permite visualizar como varía el gradiente de densidad de un flujo que circula alrededor de una superficie o elemento, este método permite una imagen donde se observa cómo se comporta el fluido a velocidades supersónica sobre una superficie, y como se reflejan las ondas de choque sobre esta superficie; con estos datos visualizados se puede establecer parámetros de diseño con características aerodinámicas del fenómeno a estudiar, ya que por la naturaleza de esta técnica pueden llegar a ser más precisa para el comportamiento de un fluido que diferentes técnicas de visualización. Esta técnica permitirá a profesores, investigadores y estudiantes desarrollar diferentes espacios académicos y proyectos de investigación por medio del análisis más exacto de fotointerpretación que permite la creación de investigaciones de mayor nivel y calidad a nivel aeroespacial.

Capítulo 3

Marco Referencial

3.1 Schlieren

La visualización de flujo es una de las herramientas fundamentales de la investigación aeronáutica, y la fotografía *schlieren* se ha utilizado durante muchos años para visualizar los gradientes de densidad del aire causados por el flujo aerodinámico. Tradicionalmente, este método ha requerido óptica compleja y precisamente alineada, así como una fuente de luz brillante. Los rayos de luz refractados revelaron la intensidad de los gradientes de densidad del aire alrededor del objeto de prueba, usualmente un modelo en un túnel de viento. Como se puede observar en la figura 1 la captura de imágenes esquemáticas de una aeronave a gran escala en vuelo fue aún más difícil debido a la necesidad de una alineación precisa del avión con la cámara y el sol. [1]

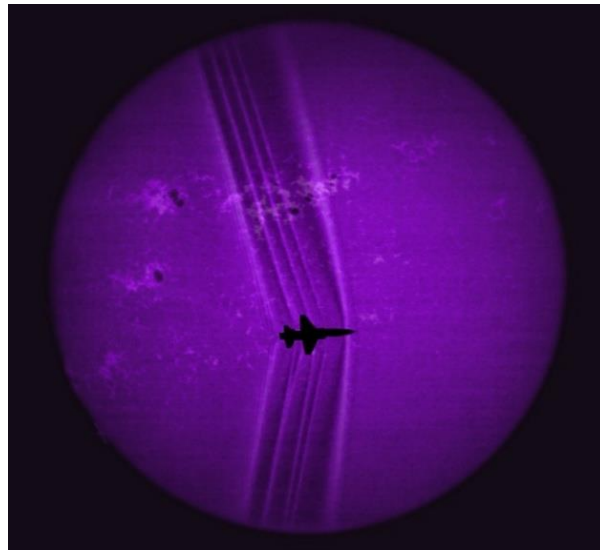


Figura 1: fotografía schlieren [1]

La técnica de *schlieren*, se basa en el principio de un objeto con índice de refracción variable se coloca entre los espejos del arreglo *schlieren* que coliman la luz proveniente de una fuente puntual, ocurre un desplazamiento en la dirección de los rayos incidentes en el plano de observación. Esta desviación en los rayos de luz es proporcional a las variaciones del índice de refracción del objeto bajo estudio, y para el caso de fluidos, esta variación en el índice de refracción se puede relacionar con la densidad del fluido y entonces se puede obtener la medición de la temperatura utilizando la relación de Gladstone-Dale. [2]

3.1.1 Historia de la técnica de schlieren

Los primeros trabajos que empezaron a hablar sobre este tema fueron los realizados por Robert Hooke, L. Foucault y A. Toepler [3], entre otros. Esta técnica fue desarrollada para el control de calidad de las lentes utilizadas en microscopios y telescopios de la época. El concepto de la técnica de *schlieren* fue utilizado por primera vez por Huygens y publicado en La Dioptrique [4].

La palabra *schlieren* proviene de la palabra en alemán “*schliere*” que significa no homogéneo (estrías), que para este caso son partículas de polvo en algún líquido transparente o cambios de densidad en algún flujo de fluido transparente. Leonard Foucault realizó importantes contribuciones a la óptica de medios no homogéneos. En sus experimentaciones desarrolló la prueba de la navaja para espejos utilizados en telescopios astronómicos y era la primera vez que se utilizaba (pupila, diafragma, filtro o borde de navaja) externa a la pupila del ojo humano para producir imágenes de *schlieren*. [5]. August Toepler reinventó algo similar a la técnica de *schlieren* en 1859 y la nombró conforme a lo que el observaba, en la Fig. 2 se muestra el arreglo de Toepler [6]

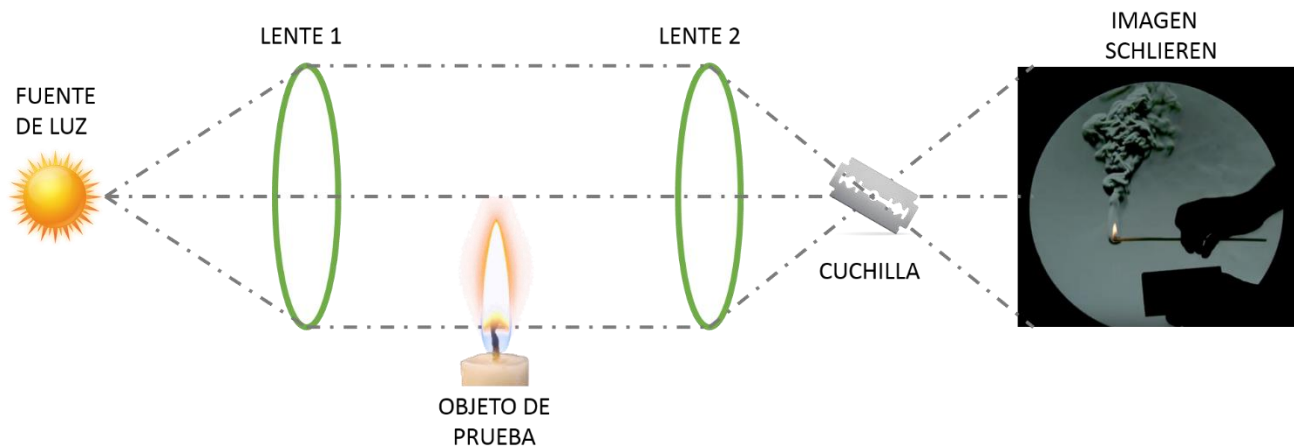


Figura 2. Arreglo de Toepler [7]

Quien reconoció a la técnica *schlieren* como una herramienta invaluable, fue Ernst Mach quien contribuyó en el desarrollo de la dinámica de gases. Mach combinó la fotografía con *schlieren* y estos desarrollos permitieron la medida precisa de la velocidad de las ondas. [8] En Alemania a la técnica de *schlieren* la utilizaba L. Prandtl como herramienta clave para liderar la dinámica de fluidos. [9] Carl Cranz y sus estudiantes como H. Schardin, proveen por primera vez un marco teórico sólido de la teoría de *schlieren* por imágenes. Usando la técnica de *schlieren* de filtro graduado propuesto por North y otras mediciones [10].

Así pues, las imágenes de *schlieren* y *shadowgraph* han dado un gran impacto a la ciencia y la tecnología. Brown y Roshko, publicaron un trabajo donde con la utilización de *shadowgraph* observaron estructuras coherentes en la mezcla de dos flujos planos de gas. Ralph Ashby Burton y varios contemporáneos desarrollaron independientemente la idea de

óptica de schlieren con fuente extendida, sugerida anteriormente por Schardin [11]. Más recientemente esta idea ha sido desarrollada en la NASA por M. Weinstein. En 1990 Weinstein puso su atención a las técnicas de schlieren con lentes y rejillas [12]. Weinstein y G. S. Settles, discutieron la idea de la aplicación de schlieren a larga escala fuera del laboratorio. La lista de investigadores continúa creciendo día con día, ya que aún se sigue trabajando sobre este tema y continúan surgiendo nuevas y extraordinarias aplicaciones. [13]

3.1.2 Tipos De Montajes De Schlieren

Existen diferentes tipos de arreglos del sistema *schlieren* propuestos por varios autores que utilizan diferentes componentes como lentes, espejo, rejillas, vidrios esmerilados entre otros. También se han utilizado diferentes fuentes de luz como son de filamento, lámparas de mercurio, sodio, xenón, láser y diodos de luz blanca. Así también en lugar de bordes de navaja se han utilizado filtros de color y máscaras de diferente forma. Cambiando las componentes anteriores dan lugar a diferentes tipos de arreglos de schlieren tales como el arreglo de Toepler y sus variantes, Background Oriented Schlieren (BOS) y Rainbow Schlieren. [2]

Arreglo de Toepler, el arreglo Toepler se puede modificar de muchas formas. Lo anterior se puede realizar ya sea utilizando lentes, espejos, prismas etc., como se puede observar en la Fig. 3 que muestra el arreglo de *schlieren* de configuración-Z. Este tipo de arreglo consta de una fuente de luz, filtro espacial, dos espejos esféricos, borde de navaja y un sistema formador de imágenes. La ventaja de este arreglo schlieren es que las lentes del sistema original de Toepler se cambian por los dos espejos, dependiendo de la distancia focal de estos, entonces da la posibilidad de aumentar el tamaño de la región de prueba ya que los espejos se pueden fabricar de mayor diámetro que las lentes. La desventaja es que los espejos pueden tener aberraciones de coma y astigmatismo. La sensibilidad de este sistema se puede incrementar con el aumento de la distancia focal de los espejos. [3]

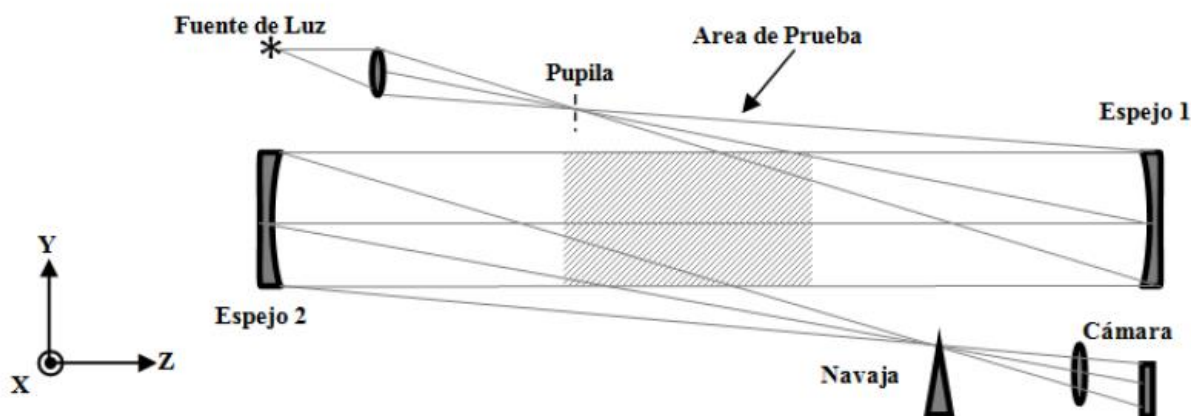


Figura 3. schlieren tipo-z [2]

La técnica de Background Oriented Schlieren (BOS): que también se le conoce como *schlieren* con fondo orientado, es una técnica parecida a la interferometría y fotografía de moteado. Uno de los primeros que utilizó esta técnica fue Köpf (1972). Esta técnica ofrece la ventaja de que se puede obtener información de un flujo de aire ya sea cualitativa o cuantitativamente. Al introducir un objeto transparente entre el fondo granulado y el sistema formador de imágenes se obtendrá en la pantalla una imagen del objeto causado por el cambio de índice de refracción del mismo. Para obtener la información del fluido es necesaria una imagen de referencia sin flujo, y para obtener información de las imágenes de la prueba con flujo se utilizan métodos de correlación. [14]

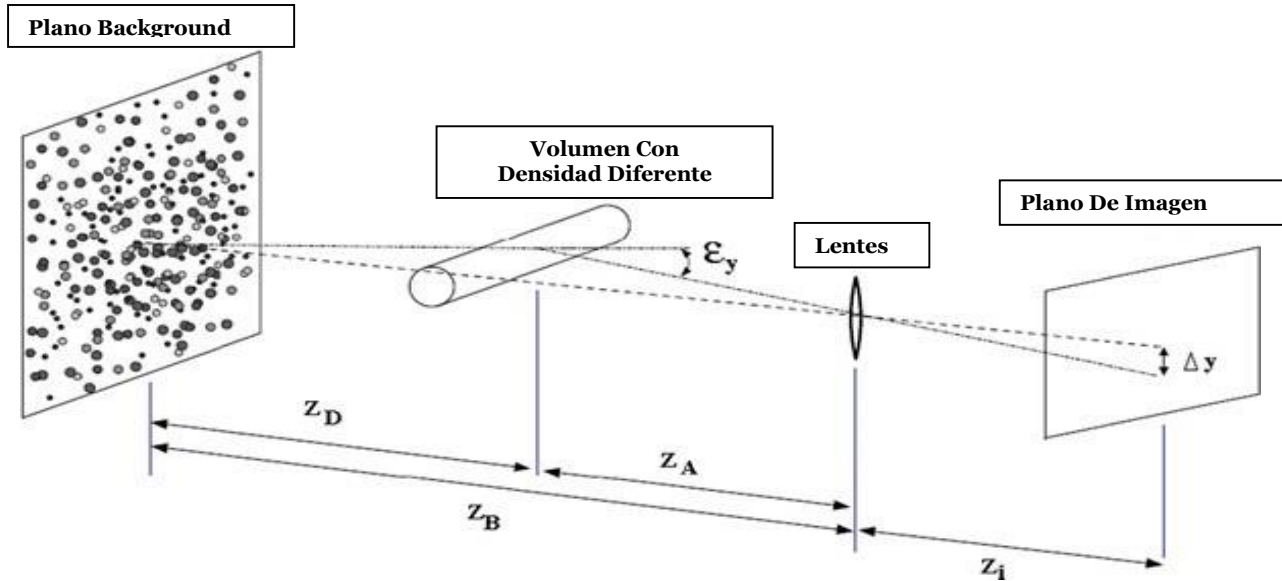


Figura 4. schlieren tipo- Background [2]

Rainbow Schlieren o schlieren de color: es un tipo de arreglo que puede cuantificar densidad de un flujo de fluido transparente como los gases. El arreglo experimental es básicamente el mismo que el utilizado por el método de Toepler, la única diferencia es que en lugar de borde de navaja se utiliza un filtro de color, colocado en el foco de la lente. Al cambiar el borde de la navaja por el filtro de color también cambiará la imagen en el sistema visualizador o de captura por lo tanto es imperativo utilizar una cámara de color y por consiguiente también una fuente de luz blanca. Si se observa un objeto con cambios de índice de refracción, se desviarán los rayos de luz un cierto ángulo y estos al pasar por el plano focal de la lente se desviará cierta distancia del eje del sistema, tocando al filtro en un color correspondiente al grado de desviación, como hay rayos que se desvían más que otros se formará una imagen con sombras de diferentes colores. La mayoría de las técnicas ópticas empleadas para determinar el índice de refracción en fluidos en tres dimensiones emplea la integración a lo largo de un camino óptico, lo que produce un promedio de la medición de las variables temperatura y velocidad. Sin embargo las mediciones locales de dichas variables no pueden ser determinadas de una sola imagen. Pero para flujos de fluido en dos dimensiones es posible determinar la temperatura y velocidad promedio en la dirección de la iluminación por lo que se prefiere el arreglo schlieren entre las otras técnicas ópticas que existen. [15]

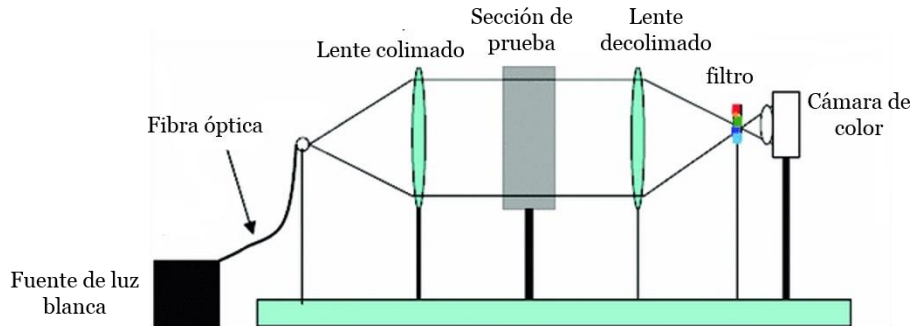


Figura 5. Schlieren tipo- Rainbow Schlieren o schlieren de color [16]

3.1.3. Comparación Y Elección De La Técnica Schlieren

Después de analizar las ventajas y desventajas de cada una de las diferentes configuraciones *schlieren* procedemos a seleccionar la mejor opción para el montaje a realizar en la Fundación Universitaria Los Libertadores dicho proceso se plasma en la tabla 1.

TIPO DE MONTAJE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CONFIGURACIÓN TIPO-Z	Gran espacio de pruebas	Difícil calibración y puesta a punto
	Libre de coma	Sufre de astigmatismo
	Sistema robusto y alta sensibilidad	Se requieren dos espejos parabólicos iguales
CONFIGURACIÓN CON UN ÚNICO ESPEJO Y ALINEACIÓN AL EJE	Sistema con mayor sensibilidad	Espacio de pruebas reducido
	Fácil calibración y puesta a punto	Posibles interferencias al haz de luz por parte de los objetos de las pruebas
	Libre de coma y astigmatismo	Difícil adquisición del espejo esférico
CONFIGURACIÓN CON LENTES	Sistema con los elementos en serie	Necesita de lentes de alta calidad superficial e interna
	Sencilla calibración y puesta a punto	Elevado costo de los lentes respecto a sus dimensiones
	Sistemas libres de coma y astigmatismo	Sistema con aberraciones cromáticas
CONFIGURACIÓN CON UN ÚNICO ESPEJO Y ALINEACIÓN FUERA DEL EJE	Alta sensibilidad	Sufre de coma y astigmatismo
	Uso de un solo espejo parabólico	Espacio de pruebas reducido
	Fácil calibración y puesta a punto	-----

Tabla 1. Ventajas y desventajas configuración schlieren

3.1.4. Selección del montaje schlieren optimo

Como se puede observar en la tabla 2 el sistema que mayor porcentaje obtuvo al momento de la evaluación de las diferentes configuraciones schlieren en las cuales se obtiene que la técnica tipo-Z es la más eficiente para la observación de fenómenos y ensayos a realizarse en los laboratorios de la fundación universitaria los libertadores, por este motivo se procede al diseño y construcción de la técnica de schlieren tipo-Z.

La calificación de los requisitos se califica de 1 a 5 donde:

1= insuficiente, 2= deficiente, 3=aceptable, 4= bueno, 5 excelente

Nº	Requisitos del montaje de schlieren	Montajes			
		Tipo-Z	Único espejo alineación coincidente	Único espejo alineación no coincidente	Configuración con lentes
1.	Espacio de pruebas	5	2	3	5
2.	Alta sensibilidad	4	5	4	2
3.	Minimización de aberraciones	4	5	3	3
4.	Calibración y puesta a punto	3	4	4	4
5.	Adaptable y reconfigurable	5	2	3	2
6.	Minimización de costos	3	4	4	1
Total puntos		24	22	21	17
Porcentaje		80%	73.4%	70%	56.6%

Tabla 2. Ponderación de los sistemas schlieren

3.2 Diseño de técnica schlieren tipo-z en la Fundación Universitaria Los Libertadores.

Dentro de las diferentes configuraciones schlieren que existen se optó por la construcción y diseño de la técnica tipo-z la cual es la más adecuada que se puede aplicar en los laboratorios de aerodinámica en la institución, llevando a cabo los objetivos planteados para el desarrollo de esta investigación, se realizaron los diferentes diseños en el software CATIA de las partes y componentes para la construcción del banco de la técnica como también los diferentes cálculos que esta exige, para la selección de los diferentes componentes necesarios para el montaje los cuales son:

- Dos espejos cóncavos de 160mm de diámetro
- Bases para fijar componentes como (cuchilla, haz de luz, cámara y espejos)
- Cuchilla
- Cámara de video de alta resolución
- Haz de luz colimada
- Banco de trabajo (para realización del montaje)

3.2.1. Montaje Schlieren Tipo-Z

3.2.1.1. Distribución

Se distribuyen los diferentes componentes en el banco o mesa de trabajo donde se monta el sistema de *schlieren* tipo-z el cual debe ser enfocado en las aberraciones ópticas y las características de los espejos, para formar el espacio de pruebas suficiente y el posicionamiento de los colectores. En la figura 6 se mostrara las condiciones y variables que se deben tener en cuenta para la construcción y configuración de la técnica schlieren tipo-z, y se procede a explicar los criterios de distribución:

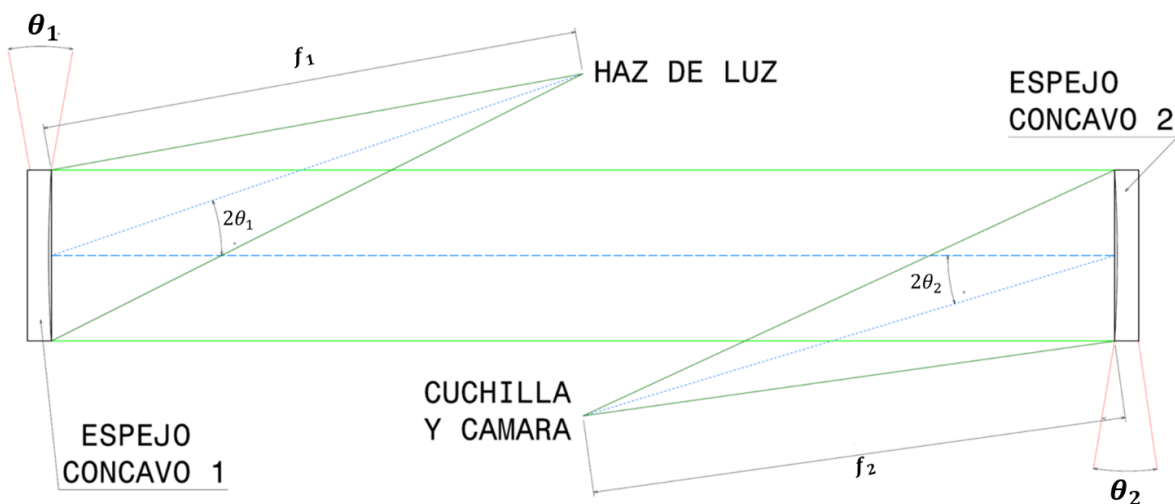


Figura 6. Distribución schlieren tipo-Z

1. El haz de luz debe ser situado en la distancia focal del espejo cóncavo 1 (f_1) con un Angulo de incidencia que es el doble al ángulo de compensación θ_1 el ángulo de compensación es el ángulo de giro del espejo en el eje XZ respecto al eje Y.

Para esta técnica se deben utilizar dos espejos cóncavos iguales por lo que podemos decir que:

$$\text{Angulo de compensación} = \theta_1 = \theta_2 = \theta$$

$$\text{Angulo de incidencia} = 2\theta_1 = 2\theta_2 = 2\theta$$

$$\text{Distancia focal} = f_1 = f_2 = f$$

2. El haz de luz es colimado y reflejado por el espejo 1 hacia el espejo 2 el cual debe ser situado y alineado al eje óptico y a una distancia mínima del doble de la longitud focal f ($2f$) la cual garantizara una amplia zona de pruebas.

3. El espejo 2 tiene un ángulo de compensación igual al del espejo 1, pero en sentido contrario el cual colima el haz de luz hacia la cuchilla la cual debe ser situada con un ángulo de incidencia 2θ y una distancia focal f .

4. por último se fija la cámara la cual debe de estar a máximo 10 cm de la cuchilla, la cual debe ir centrado el lente con el orificio de la cuchilla por donde va a pasar el haz de luz, la cual debe quedar perfectamente alineada

3.2.2. Cálculos matemáticos para el montaje tipo-z

Estos cálculos matemáticos estarán basados en las características de los espejos seleccionados los cuales deben ser iguales, por lo tanto cuentan con un ángulo de compensación igual, esto para disminuir la aberración de coma, ya que este efecto cuando el haz de luz se refleja en el espejo 1, se compensa al girar con el mismo ángulo al espejo 2 esto facilita la observación con más claridad de la imagen *schlieren*, por tal motivo con una calibración precisa de la configuración en z se elimina este efecto.

Características de los espejos seleccionados:

Diámetro del espejo $d = 160\text{mm}$

Distancia focal $f = 1300\text{mm}$

Espesor = 20mm

Ecuaciones para espejos cóncavos Un espejo esférico cóncavo se caracteriza por que al incidir sobre él un haz de rayos paralelos, los refleja haciéndolos convergir en un punto denominado foco, situado a una distancia igual a la mitad del radio de curvatura del espejo. [17]

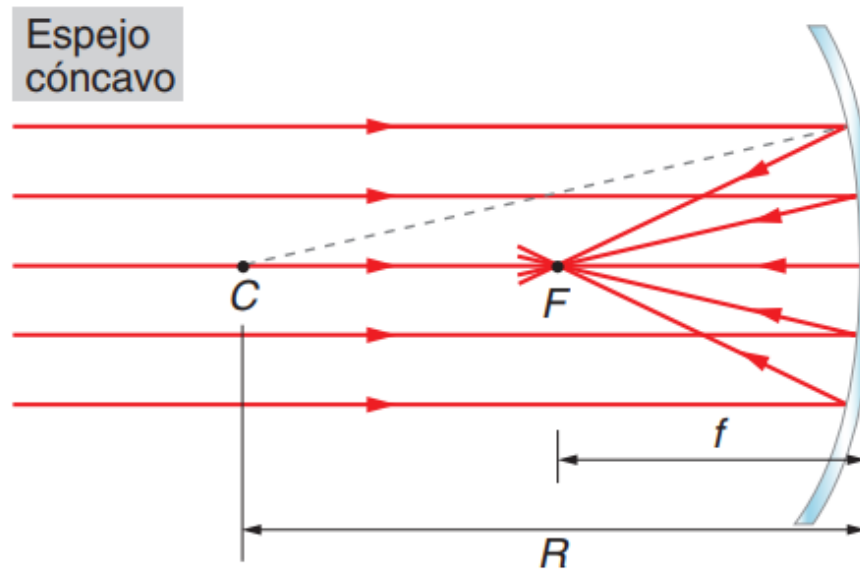


Figura 7. Variables espejo cóncavo [17]

Donde:

C= centro del foco

F= foco

R=radio de curvatura del espejo

f= distancia focal = $\frac{R}{2}$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

(ecuacion 1)

Donde:

f= distancia focal

p= distancia del objeto al espejo

q= distancia de la imagen a la espejo

$$I = \frac{qO}{p}$$

(ecuacion 2)

Donde:

I= Tamaño de la imagen

p= distancia del objeto al espejo

q= distancia de la imagen a la espejo

O=Tamaño del objeto

$$f = \frac{R}{2} \quad (\text{ecuacion 3})$$

Donde:

f= Distancia focal

R=radio de curvatura del espejo

De la ecuación 3 se puede deducir el radio de curvatura del espejo que será igual a:

$$f = \frac{R}{2}$$

$$\text{Radio de curvatura } R = 2 * f = 2 * 1300 = 2600$$

A continuación se procede a calcular el astigmatismo el cual no se puede eliminar pero si minimizar para ellos se utiliza la distancia focal y la distancia tangencial como se evidencia en la ecuación 4 de esta ecuación se deduce que si se reduce el ángulo de compensación θ se reduce el astigmatismo en la formación de las imágenes de schlieren.

$$\text{relacion de la severidad del asigmatismo} = \Delta f = f * \frac{\sin(\theta)^2}{\cos(\theta)} \quad (\text{ecuacion 4})$$

Para minimizar el astigmatismo se recomienda emplear ángulos de compensación inferiores a 8° además para asegurar que no se presente astigmatismo y que las imágenes sean nítidas y de alta calidad es recomendable el uso de espejos cóncavos con radio focal comprendido entre 6 y 12. El diámetro focal es la relación entre la longitud focal y el diámetro del espejo como podemos ver en la ecuación 5

$$\text{radio focal} = n = \frac{f}{d} \quad (\text{ecuacion 5})$$

Donde:

$$\begin{aligned} f &= 1300 \text{ mm} \\ d &= 160 \text{ mm} \end{aligned}$$

Por lo tanto nuestro diámetro focal es igual a:

$$n = \frac{1300 \text{ mm}}{160 \text{ mm}} = 8.125$$

Con la selección de los espejos fijamos el ángulo de compensación en este caso será de 5° es cual cuando se configure el sistema se puede reducir si el astigmatismo es considerable, para

obtener imágenes *schlieren* de calidad. Si se modifica el ángulo de compensación se modifica automáticamente el ángulo de incidencia ya que este es el doble del ángulo de compensación en este caso será de (10°) . Con el Angulo de compensación de 5° procedemos a calcular la relación de severidad del astigmatismo mediante la ecuación 4 entonces tenemos que:

$$\Delta f = f * \frac{\sin(\theta)^2}{\cos(\theta)}$$

Donde:

$$f = 1300 \text{ mm}$$

$$\theta = 5^\circ$$

Por lo tanto nuestra relación de astigmatismo es de:

$$\Delta f = 1300 * \frac{\sin(5^\circ)^2}{\cos(5^\circ)} = 9.91$$

Con el ángulo de compensación fijado por los espejos cóncavos en nuestra configuración tipo-z se puede observar que la severidad del astigmatismo es mínima por lo que es posible asegurar que con $\theta = 5^\circ$ se van a obtener las imágenes *schlieren* de alta calidad. Teniendo seleccionados los espejos y fijados los ángulos de compensación se diseña la distribución del sistema schlieren tipo-z, como se observa en la figura 8, se toma una distancia entre espejos de 3000mm para tener una buena zona de pruebas ya que la distancia mínima es del doble de la longitud foca de los espejos $2f$.

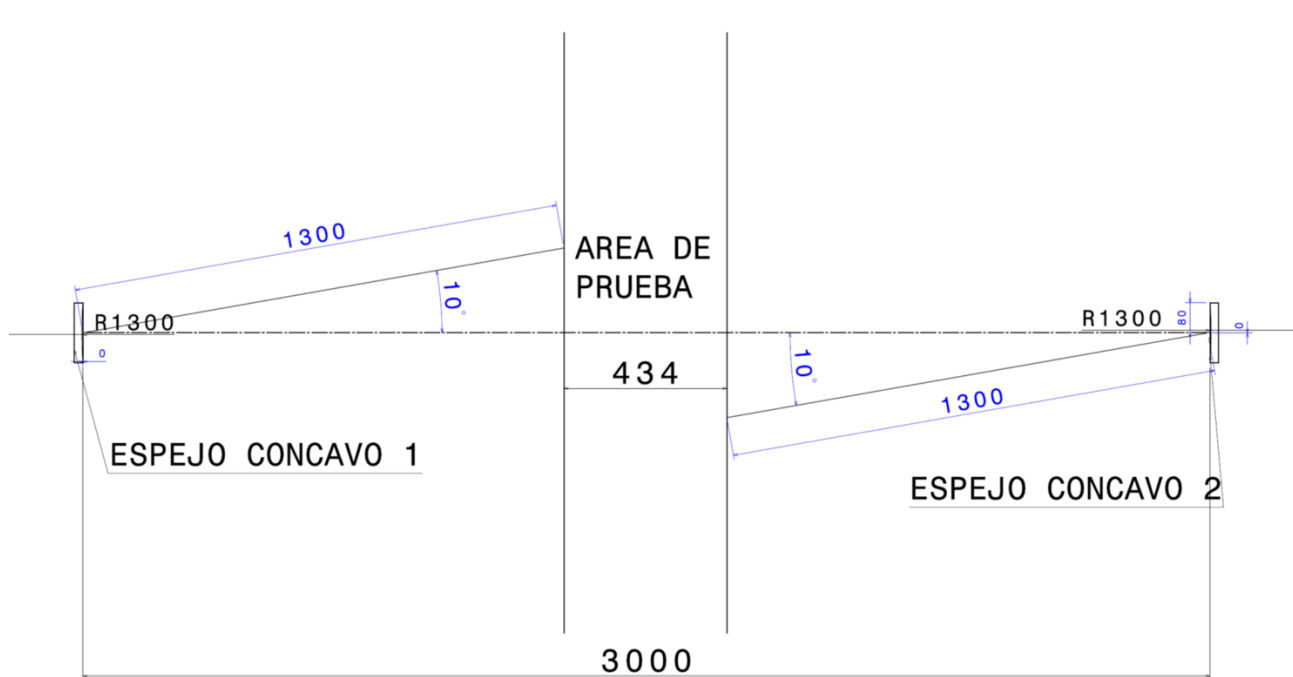


Figura 8. Medidas Montaje Schlieren Tipo-Z

3.2.3. Diseño de componentes de schlieren tipo-z en software

CATIA

Espejos. Se escogieron dos espejos cóncavos de la misma característica como se muestra en la figura 9 ya que para la técnica *schlieren* tipo-z se restringe la distancia focal y teniendo en cuenta los antecedentes de la técnica, los espejos poseen las siguientes características.

Diámetro del espejo $d = 160\text{mm}$

Distancia focal $f = 1300\text{mm}$

Espesor = 20mm

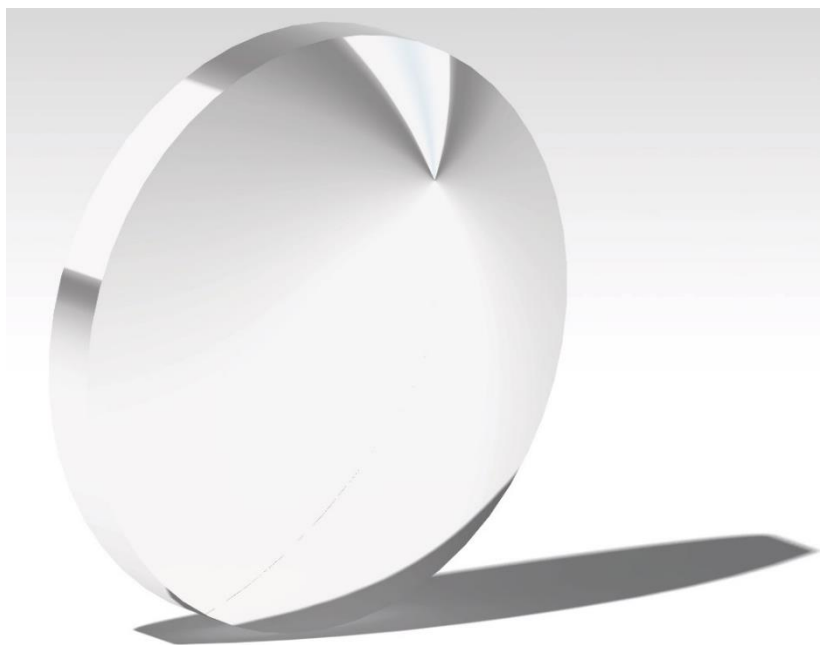


Figura 9. Espejo cóncavo

Base para fijar el espejo La base para fijar los espejos consta de dos láminas de acero rectificado xw5 una de 200x200mm y otra de 200x300mm las cuales sirven como soporte al amarre, el cual está construido por una lámina de acero ASTM 36 el cual abraza el espejo y se fija mediante un perno en mariposa y se enroscará ala lamina de soporte mediante una varilla de 100mm de acero enroscada como se observa en la figura 10.



Figura 10. Base para espejo

Cuchilla y base para fijar se utiliza una cuchilla para filtrar el paso de luz con el lente de la cámara, con los que se consigue una mejora del contraste del haz de luz incidente en la cámara lo que mejora la percepción de los gradientes, la cual tiene que estar en el centro del espejo y el lente de la cámara, está construida por una placa de acero que soportara una varilla que enroscara en ella y la cual soportara la cuchilla como se muestra en la figura 11.



Figura 11. Base para cuchilla

Haz de luz colimada, el haz de luz debe proporcionar una haz de luz homogéneo, es decir que la luz tenga una proyección uniforme y se formen los haces con la misma luminosidad, en este proyecto utilizaremos un láser de alta intensidad el cual será fijado a una varilla de acero como se muestra en la figura 12 que lo centra con los espejos y el lente de la cámara.

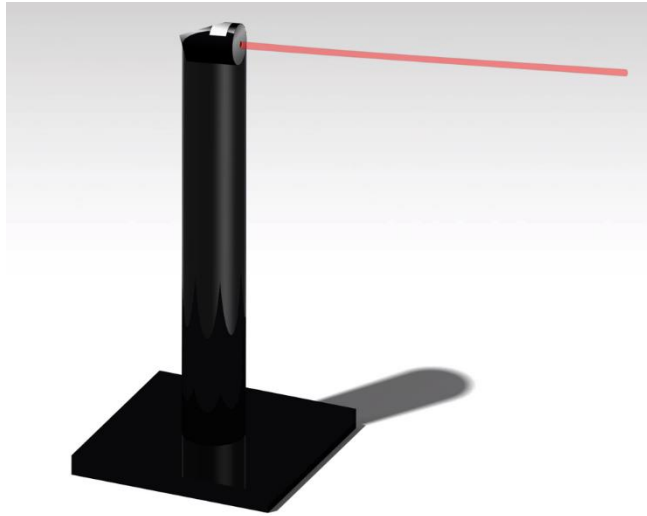


Figura 12. Haz de luz

Cámara de video, es el objeto que se utiliza para captar la imagen *schlieren* se utiliza una cámara de video profesional de alta resolución, la cual debe estar perfectamente centrada con los espejos, el haz de luz y la cuchilla de filtro en la imagen 13 se observa una cámara con características esenciales para la captación de imágenes *schlieren*.



Figura 13. Cámara de video Canon

Mesa de trabajo, el montaje *schlieren* tipo-z está diseñado para ser fijado en una mesa de trabajo con una superficie plana como se muestra en la figura 14, para una mejor alineación de todos los componentes, los cuales son fijados mediante tornillos a esta.



Figura 14. Mesa de trabajo

Configuración schlieren tipo-z, se realiza el montaje de todos los componentes en la mesa de trabajo, para que queden precisamente alineados los espejos con la cámara como con el haz de luz como se muestra en la figura 15.

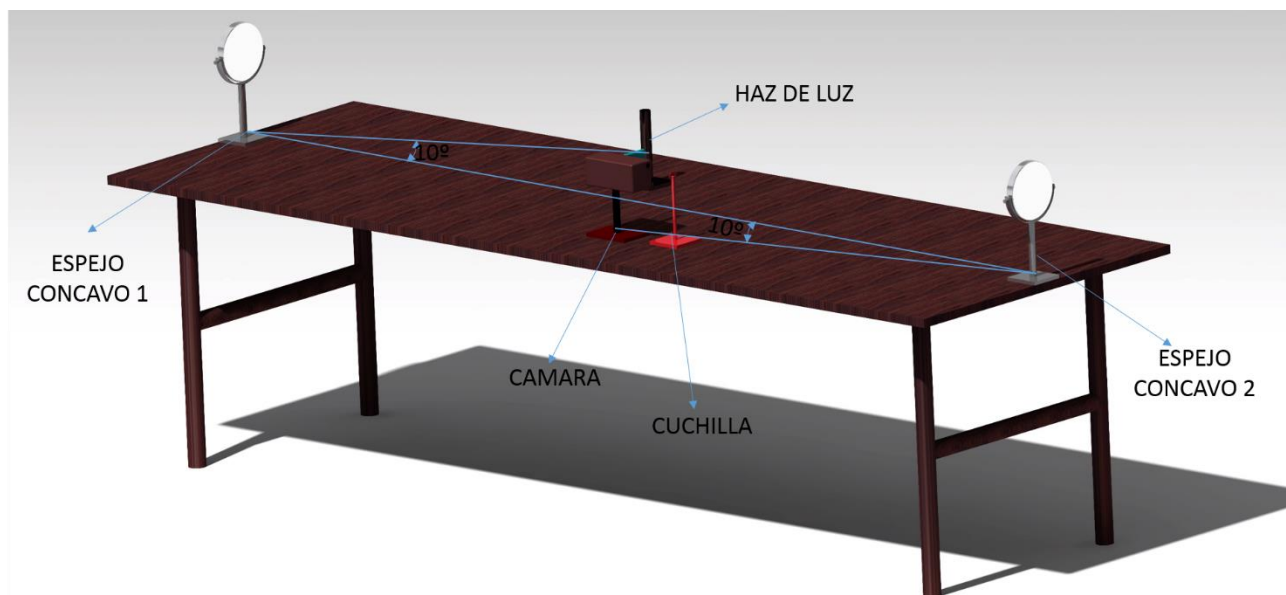


Figura 15. Configuración schlieren tipo z

Todos los componentes de la técnica de *schlieren* que se implementan en la Fundación Universitaria Los Libertadores fueron diseñados en el software CATIA con el cual cuenta con una licencia la universidad.

Capítulo 4

Metodología aplicada

4.1. Metodología Experimental

La metodología que se usará en el proyecto de grado será experimental, Bisquera establece y define que para la realización de un proyecto de investigación que tenga la construcción o implementación de un experimento se utiliza la metodología experimental que se desarrolla en diferentes etapas. Este es el tipo de metodología que se va a utilizar en este proyecto ya que se trata de la construcción de un experimento como lo es la técnica de *schlieren* en (Z), [18]

4.2. Etapas De La Metodología

4.2.1. Etapa 1: Recolección De Documentación

Búsqueda e investigación de material bibliográfico (tesis, proyectos de grado, artículos, y libros) que contengan información relacionada con este proyecto, utilizando la biblioteca de la universidad y las bases de datos a las cuales se tiene acceso para el desarrollo de esta investigación.

4.2.2. Etapa 2: Análisis De Documentos

Selección de libros, documentos y artículos que mayor información aportan a esta investigación según las condiciones de estudio, verificando su veracidad y que provengan de una fuente confiable.

4.2.3. Etapa 3: Recogida Y Análisis De Datos

Para la recolección de estos datos se utilizara un desarrollo matemático para obtener las dimensiones de nuestro modelo, usando diferentes técnicas e instrumentos. Después para analizarlos se sigue un plan de análisis de datos, que deberá haber sido previsto con

anterioridad.

4.2.4. Etapa 4: Desarrollo y construcción del montaje

Con la obtención de los datos numéricos podemos desarrollar un modelo CAD así obtener los planos para proceder a la construcción del modelo, obteniendo de las etapas anteriores los datos suficientes y los diferentes cálculos para la implementación del montaje final.

4.2.5. Etapa 5: Realización De Pruebas

Terminada la etapa de construcción se procede a hacer pruebas en el modelo de experimento realizado, como también la verificación de estos resultados mediante la comparación de resultados obtenidos en investigaciones.

5.2.6. Etapa 6: Elaboración de conclusiones

Se especifica hasta qué punto y con qué limitaciones queda confirmada la hipótesis experimental, y también el posible grado de generalización con relación al proceso que se ha seguido y con la muestra con la que se ha trabajado.

Capítulo 5

Análisis y Resultados

5.1 CONSTRUCCIÓN SCHLIEREN TIPO-Z EN LABORATORIO DE LA FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES.

Se realizó el montaje de la técnica en las instalaciones de la fundación universitaria los libertadores teniendo en cuenta los parámetros y dimensiones para la construcción de esta, como las características de los espejos. En esta técnica se ubicaron los espejos a 3m de distancia el uno del otro el haz de luz a una distancia de 1.3m con un Angulo de 10° sobre el centro del espejo al igual que la cámara como se puede observar en la figura 16.



Figura 16. Construcción técnica schlieren

Se alinearon los espejos con la cámara y el haz de luz hasta encontrar el foco y el punto de colimación como se muestra en la figura 17 donde se puede observar el efecto schlieren, para esto es recomendable alinear el sistema con un láser y fijar los componentes del sistema según las propiedades de los espejos elegidos, con la distancia focal y el ángulo de incidencia.

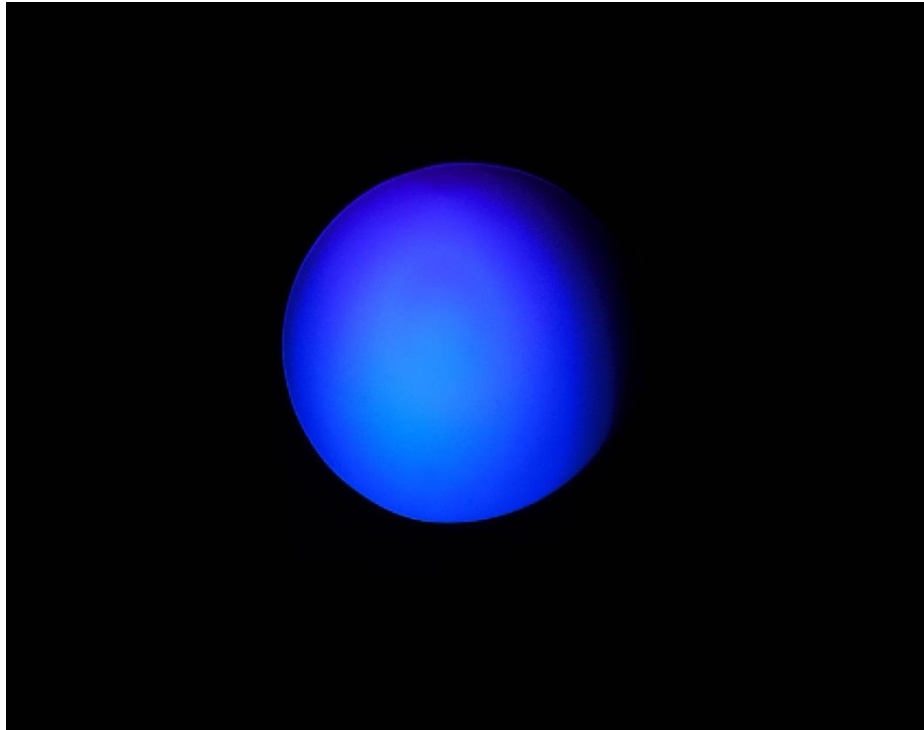


Figura 17. Espejo colimado

5.2. RESULTADOS OBTENIDOS DEL COMPORTAMIENTO DE LA CANDELA CON UNA VELA EN LA ZONA DE PRUEBAS.

Se recopilaron una serie de imágenes donde se puede observar el efecto schlieren (gradientes de densidades). Las cuales se compararon con otras técnicas de diferentes investigaciones.

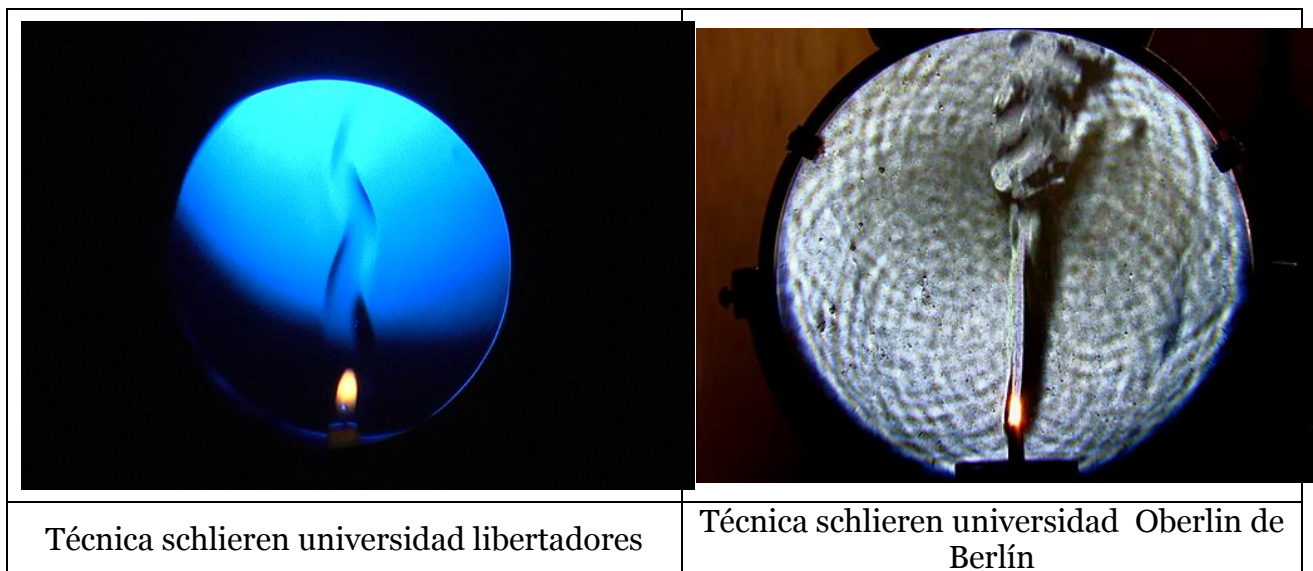


Figura 18. Comparación gradiente de densidad con vela

En la figura 18 se observó que es más notable la técnica realizada en la universidad de Oberlin esto debido a la dimensión del espejo y las características pero nosotros logramos observar también unas buenas imágenes de gradientes como se mostraran a continuación:

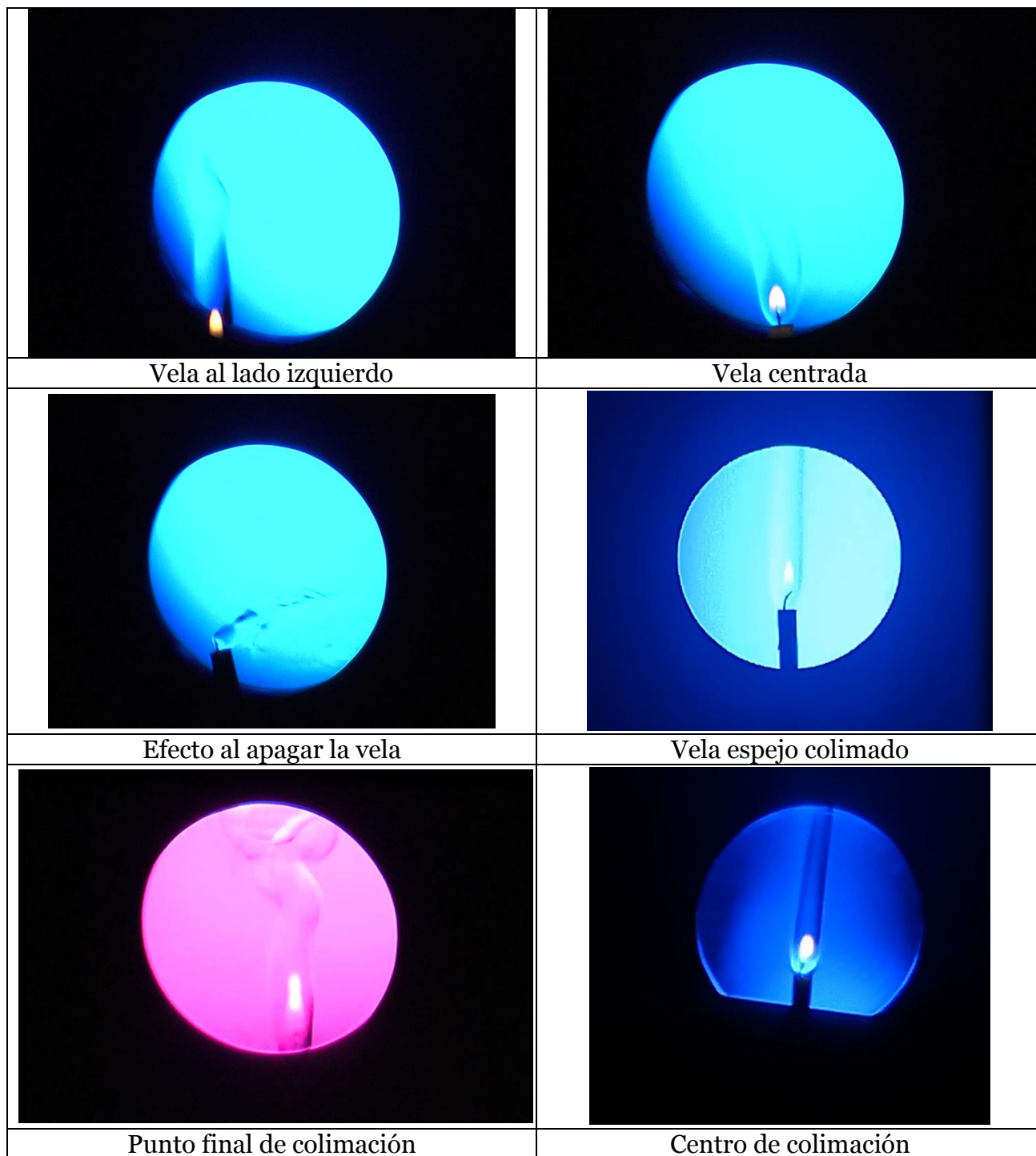


Figura 19: *schlieren* con vela

5.3. RESULTADOS OBTENIDOS DEL COMPORTAMIENTO DE LA CANDELA CON UN ENCENDEDOR EN LA ZONA DE PRUEBAS.

Se recopilaron una serie de imágenes donde se puede observar el efecto schlieren (gradientes de densidades). Las cuales se compararon con otras técnicas de diferentes investigaciones.

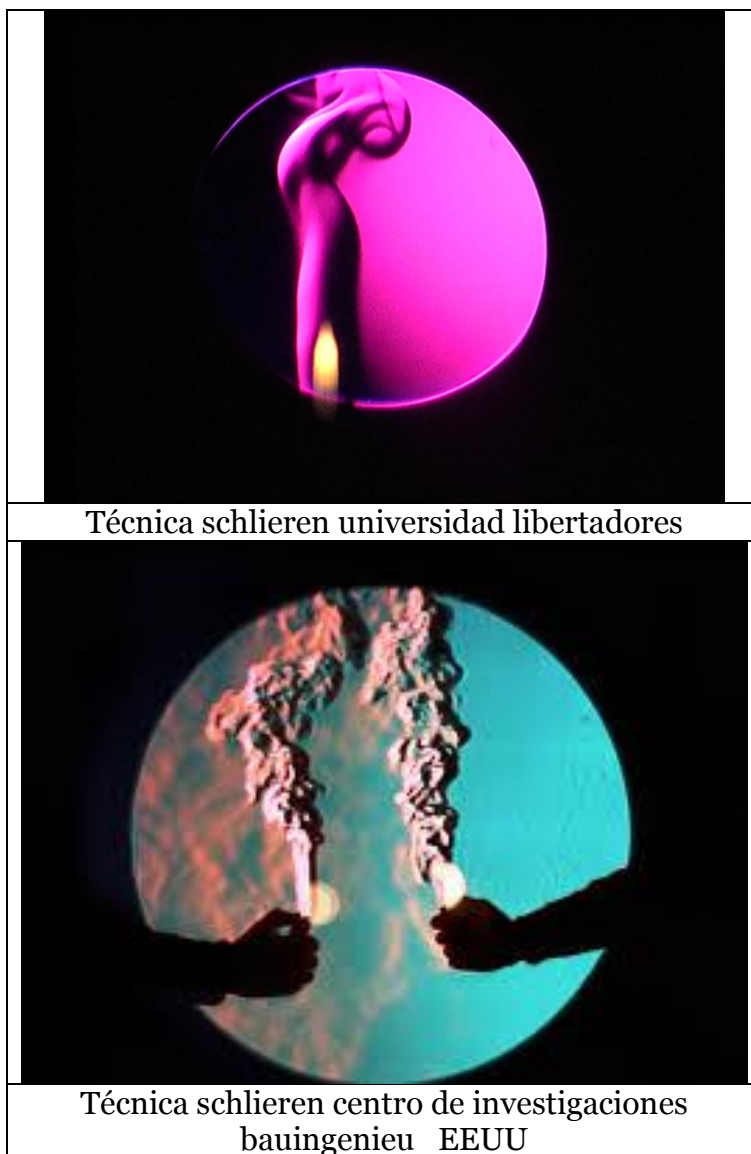


Figura 20: comparación gradiente de densidad con encendedor

En la figura 02 se observó que es más notable la técnica realizada por el centro de investigación bauingenieu esto debido a la dimensión del espejo y las características como a los elementos óptico que utilizan para la fijación de los elementos de la técnica también utilizaron un espejo de grandes dimensiones, pero nosotros logramos observar también unas buenas imágenes de gradientes como se mostraran a continuación:

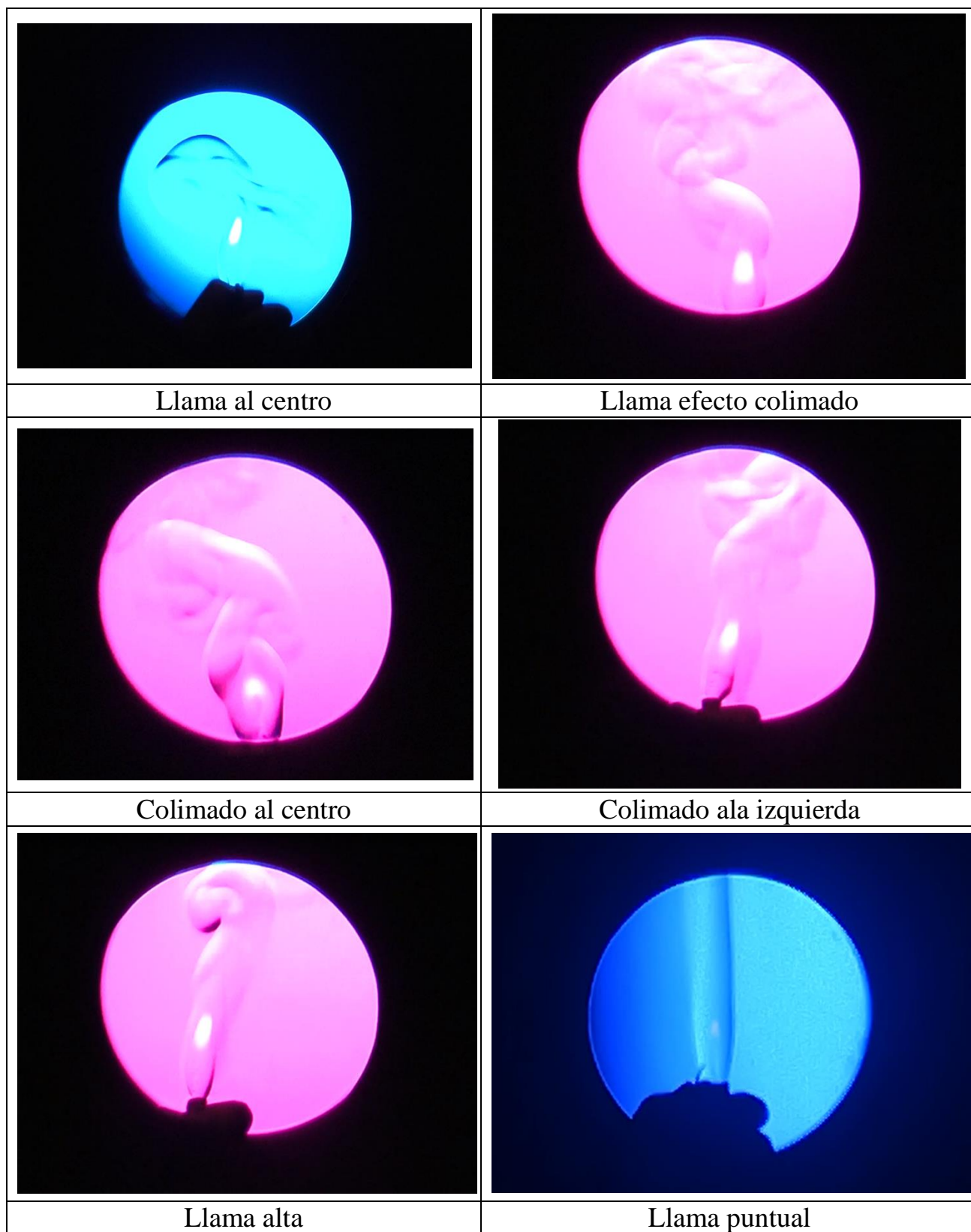


Figura 21: schlieren con encendedor

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

- Dentro de las diferentes configuraciones *schlieren* que existen se revisaron sus pros y sus contras para seleccionar la más apropiada llegando a que la técnica tipo- z es la más eficaz para el estudio de fenómenos aerodinámicos debido a su gran espacio en la sección de pruebas y a que la refracción de la luz en forma de z reduce el astigmatismo por lo cual se pueden obtener imágenes de alta calidad y esto facilita la observación del fenómeno al momento de la fotointerpretación.
- En este proyecto se partió de las técnicas ópticas de visualización de flujos, se observó que estas técnicas eran muy adecuadas para la medición cualitativa de variables físicas como la velocidad, densidad y presión en ciertos fluidos, estas técnicas ópticas pueden ser utilizadas para la cuantificación de estas variables físicas, haciendo las configuraciones pertinentes.
- Se seleccionaron los espejos teniendo en cuenta la teoría de espejos parabólicos donde se calcularon los diferentes parámetros para seleccionar el espejo más óptimo teniendo en cuenta que la sección de pruebas es óptima, se seleccionaron espejos con distancia focal amplia, teniendo en cuenta que el objeto será ubicado a el doble de la distancia focal.
- En la configuración tipo-z de la técnica *schlieren* se requieren de dos espejos de la mismas características ya que el ángulo de incidencia para fijar el haz de luz y la cámara son iguales y el ángulo de incidencia es igual al doble del Angulo de compensación de los espejos como la distancia del objeto es igual al doble de la distancia focal del espejo por esta razón se compraron dos espejos parabólicos de 1600mm de distancia focal y con un ángulo de compensación de 5°.
- La técnica permite visualizar el comportamiento del fluido basado en la variación de densidad, apoyando las actividades desarrolladas en espacios académicos del programa como aerodinámica supersónica y sistemas de propulsión espacial.
- Para la visualización de la técnica se necesitó la precisión de la misma teniendo en cuenta las características de los espejos en este caso la cámara y el haz de luz tienen que estar precisamente al ángulo de incidencia y la distancia focal al tener los componentes de la técnica en estas posiciones, a un ángulo de incidencia de 10° y una distancia focal de 1.3m, al tener esta configuración ya podemos visualizar los gradientes de densidad.
- En este proyecto fue difícil la puesta a punto debido a que en la universidad no

contamos con mesas ni soportes ópticos de igual manera como las dimensiones de los espejos las cuales por su alto costo no fueron tan grandes como los que utilizan grandes universidades y centros de investigación, a pesar de esto la técnica fue puesta a punto.

- Al visualizar los gradientes de densidad de la candela con un encendedor y una vela nos damos cuenta que se nota más la técnica de schlieren con el encendedor debido al flujo de fuego que produce, ya que la llama de la vela es más pequeña que la del encendedor visualizamos mejor los gradiente cuando en la zona de prueba estaba un encendedor.

Bibliografía

- [1] N. A. A. S. Administration:, «NASA Schlieren System,» Nasa, 07 octubre 2014. [En línea]. Available: www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/tunvslrn.html. [Último acceso: 16 septiembre 2017].
- [2] M. A. M. González, «ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE VELOCIMETRÍA ÓPTICA PARA HACER MEDICIONES DE TEMPERATURA Y VELOCIDAD.,» Centro de investigaciones en óptica., Mexico DF, 2014.
- [3] A. Toepler, Beobachtungen nach einer neuen optischen methode, Berlin : Maximilian Cohen und Sohn, Bonn., 1864.
- [4] C. Huygens, Ouvres complètes, La Haye : Nijhoff, 1901.
- [5] L. Foucsult, Mémoire sur la construction des télescopes en verre argenté, vol. 5, Paris: Annales de l'Observatoire Imperial, 1859, pp. 197-237.
- [6] Jurgen R. Meyer-Arendt, «Selected schlieren optics,» *Milestone Series*, pp. 58-102, 1992.
- [7] P. A. Y. G. Peter Merlin, «NASA,» 04 agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.nasa.gov/feature/ground-based-schlieren-technique-looks-to-the-sun-and-moon>.
- [8] E. M. a. J. Sommer., Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von explosions schallwellen", vol. 75, Naturw. Cl. Wien,: Sitzungsab. D. k. Acad. D. Wiss.Math., 1877, pp. 101-130.
- [9] L. Prandtl, NeueUntersuchungüber die strömendeBewegung der Gase und Dämpfe, vol. 8, Berlin: PhysicalischeZeitschrift, 1907, pp. 23-30.
- [10] H. C. C. Schardin, BeiträgezurBallistik and technischen Physic,, Leipzing: H. Schardin. J. A. Barth,, 1938, pp. 1-8.
- [11] G. L. B. a. A. Rshko, «On density effects and large structure in a turbulent mixing layer,» *J. Fluid Mech.*, pp. 75-816,, 1974.
- [12] L. M. Weinstein, Large-field High-brightness focusing schlieren system", vol. 31, Munech: AIAA, 1993, pp. 1250-1255.
- [13] E. B. H. J. D. M. a. L. M. W. G. S. Settles, Full scale schlieren flow visualization", New York: J. P. Crowder Begell House,, 1995, pp. 2-13.
- [14] U. Köpf, Application of speckling for measuring the deflection of láser light by phase objects", vol. 5, Berlin: Optics Comm., 1972, p. 347.
- [15] M. R. M. R. J. K. H Richard, Demostration of the applicability of a backgroun oriented schlieren (BOS) method, Meier: G. E. A., 1875.
- [16] M. A. Breazeale, «Schlieren photography in physics,» *University of National Mississippi Center for Physical Acoustics*, vol. 1, nº MS 38677, p. 184, 2001.
- [17] R. A. Serway y J. W. Jr. Jewett, Física: Para ciencias e ingeniería con Física Moderna Volumen II, New York: CENGAGE Learning., 2009.
- [18] B. Alzina, Metodología de la investigación educativa, Madrid , 2001.

- [19] A. Davidhazy, «Introduction to shadowgraph and schlieren imaging,» *Main Campus*, vol. 1, nº 123, p. 51, 25 Abril 2006.
- [20] P. K. k. m. Panigrahi, *Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat and Mass Transfer*, New York: sofscover, 2012.
- [21] A. Prof. R.J, P. M. Gharib, P. D. W. Merzkirch, P. D. D. Rockwell y P. H. Whitelaw., «Schlieren and Shadowgraph Techniques,» *Visualizing Phenomena in Transparent Media. G.S. Settles*, vol. 3, nº 540, p. 367, 1949.

Apéndice A

Presupuesto

PRESUPUESTO

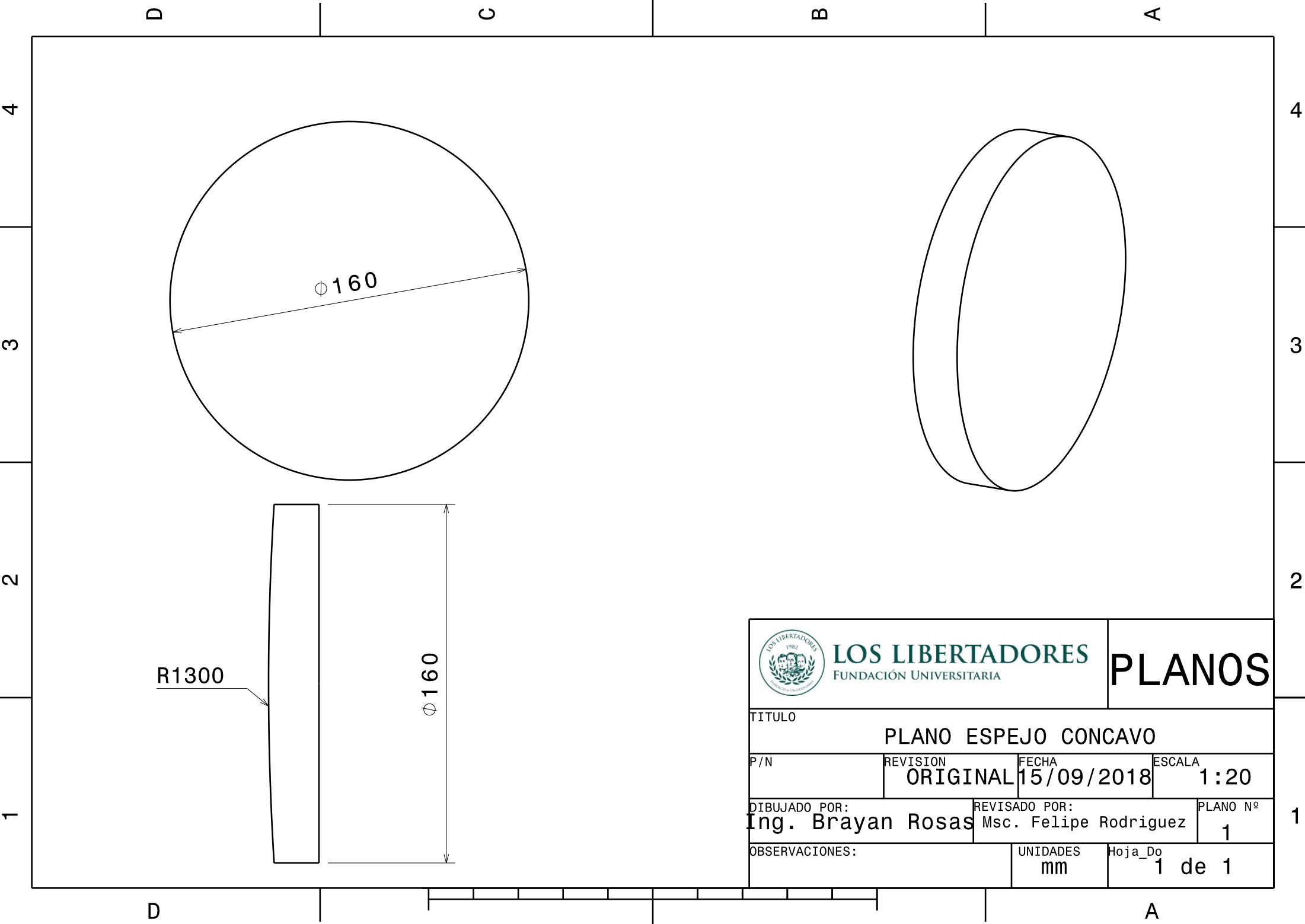
De acuerdo al planteamiento del problema, para la realización de este proyecto y la construcción de la técnica de schlieren en Z los materiales y recursos necesarios se verán en el siguiente listado:

Descripción	Cantidad	Valor c/u	Total
Espejos cóncavos de 50cm de diámetro	2	\$ 450.000	\$ 900.000
Cámara de alta resolución	1	\$ 750.000	\$ 750.000
Laser de luz colimada	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Soportes en aluminio para cámara y laser	N/A	\$ 86.000	\$ 86.000
Horas hombre	380	\$ 8.200	\$ 3.116.000
Papelería	N/A	\$ 58.000	\$ 58.000
Transportes	N/A	\$ 500.000	\$ 500.000
Otros	N/A	\$ 100.000	\$ 100.000
		Total	\$ 5.610.000

Tabla 1: Presupuesto

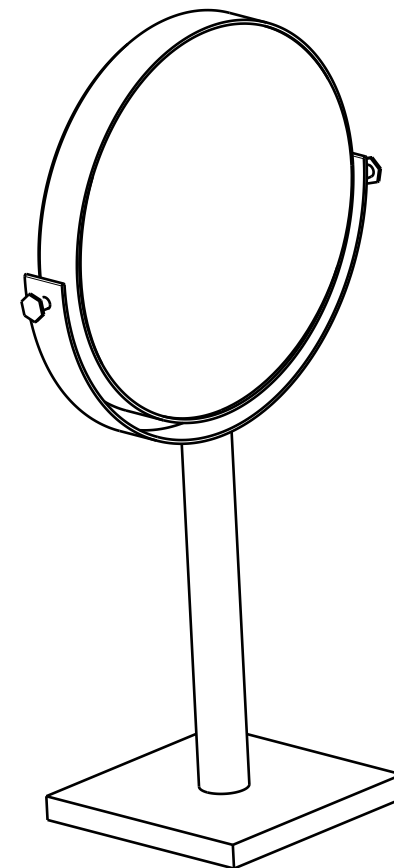
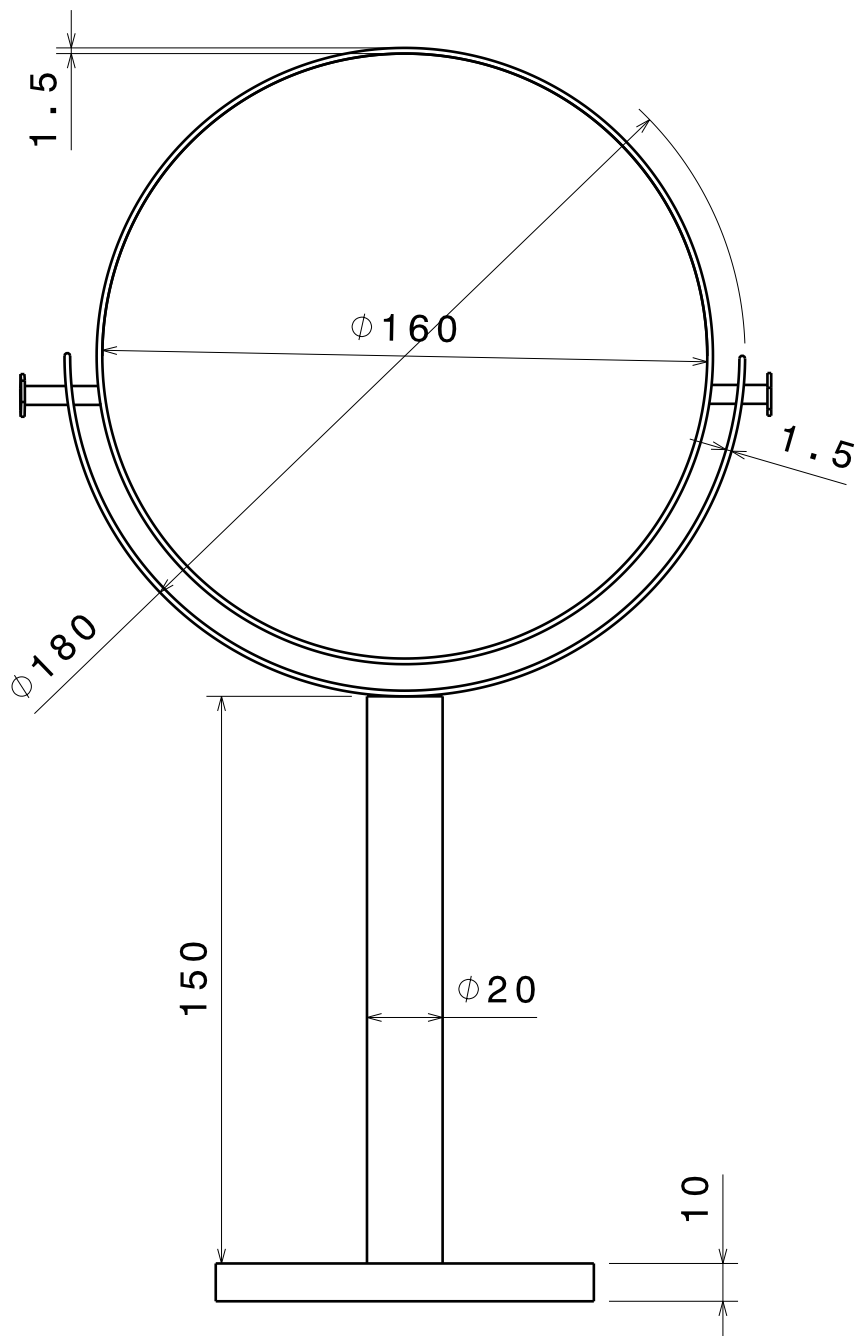
Para el diseño y simulación se recurrirá al uso de las licencias del software CATIA como también ANSYS que tiene la universidad dentro de sus laboratorios de sistemas cad cam. Como también utilizaremos libros de la biblioteca como también información de las bases de datos a las que la universidad tiene acceso esto para la recolección de la información.

Plano espejo cóncavo



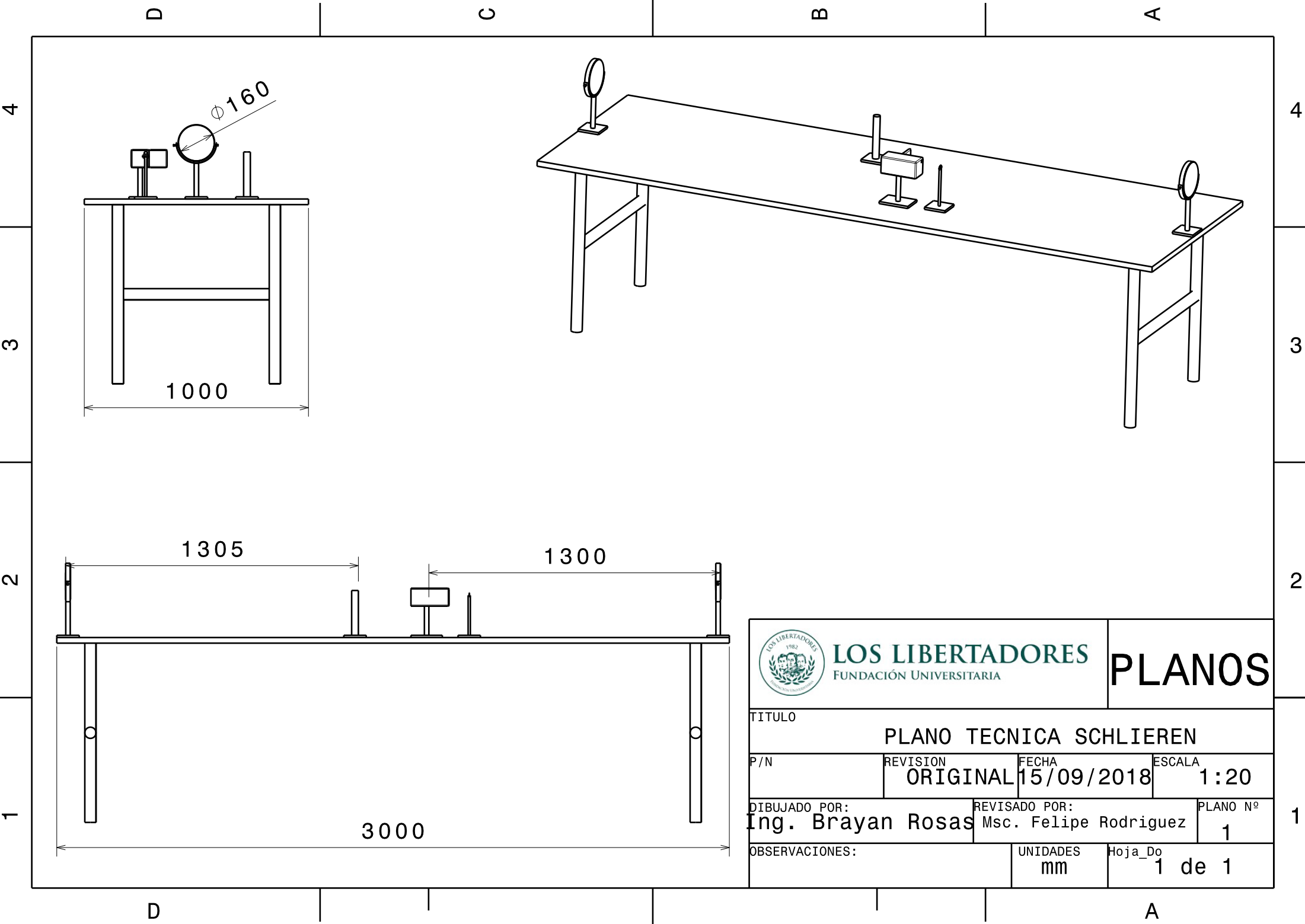
			LOS LIBERTADORES FUNDACIÓN UNIVERSITARIA		PLANOS	
TITULO PLANO ESPEJO CONCAVO						
P/N		REVISION ORIGINAL		FECHA 15/09/2018		
DIBUJADO POR: Ing. Brayan Rosas		REVISADO POR: Msc. Felipe Rodriguez			ESCALA 1:20	
OBSERVACIONES:			UNIDADES mm		PLANO Nº 1	
			Hoja_Do 1 de 1			

Plano base para espejo



 LOS LIBERTADORES FUNDACIÓN UNIVERSITARIA		PLANOS	
TITULO			
PLANO BASE PARA ESPEJO			
P/N	REVISION	FECHA	ESCALA
	ORIGINAL	15/09/2018	1:2
DIBUJADO POR:		REVISADO POR:	PLANO Nº
Ing. Brayán Rosas		Msc. Felipe Rodriguez	1
OBSERVACIONES:		UNIDADES	Hoja_Do
		mm	1 de 1

Plano montaje schlieren



 LOS LIBERTADORES FUNDACIÓN UNIVERSITARIA			PLANOS	
TITULO				
PLANO TECNICA SCHLIEREN				
P/N	REVISION	FECHA	ESCALA	
	ORIGINAL	15/09/2018	1:20	
DIBUJADO POR:		REVISADO POR:		PLANO Nº
Ing. Brayán Rosas		Msc. Felipe Rodriguez		1
OBSERVACIONES:		UNIDADES	Hoja_Do	
		mm	1 de 1	

GUIA DE LABORATORIO

GUIA DE LABORATORIO

VISUALIZACION DE ONDAS DE CHOQUE MEDIANTE TECNICA SCHLIEREN

1. MATERIALES

- a. Túnel de viento supersónico
- b. Perfil aerodinámico
- c. Técnica schlieren
- d. Soplete

2. PASO A PASO

- a. Fijar la técnica de schlieren tipo-z de la siguiente manera:
 - i. Colocar los espejos de la técnica schlieren con una distancia de 3m el uno del otro dejando en la mitad la zona de pruebas del túnel, la cual hará de zona de pruebas de la técnica schlieren tipo-z
 - ii. Colocar el haz de luz a una distancia de 1.3m y a 10° al lado izquierdo del eje del espejo 1
 - iii. Colocar la cámara de video a una distancia de 1.3m y a 10° al lado derecho del espejo 2
 - iv. Colocar la cuchilla a 10cm del lente de la cámara de video

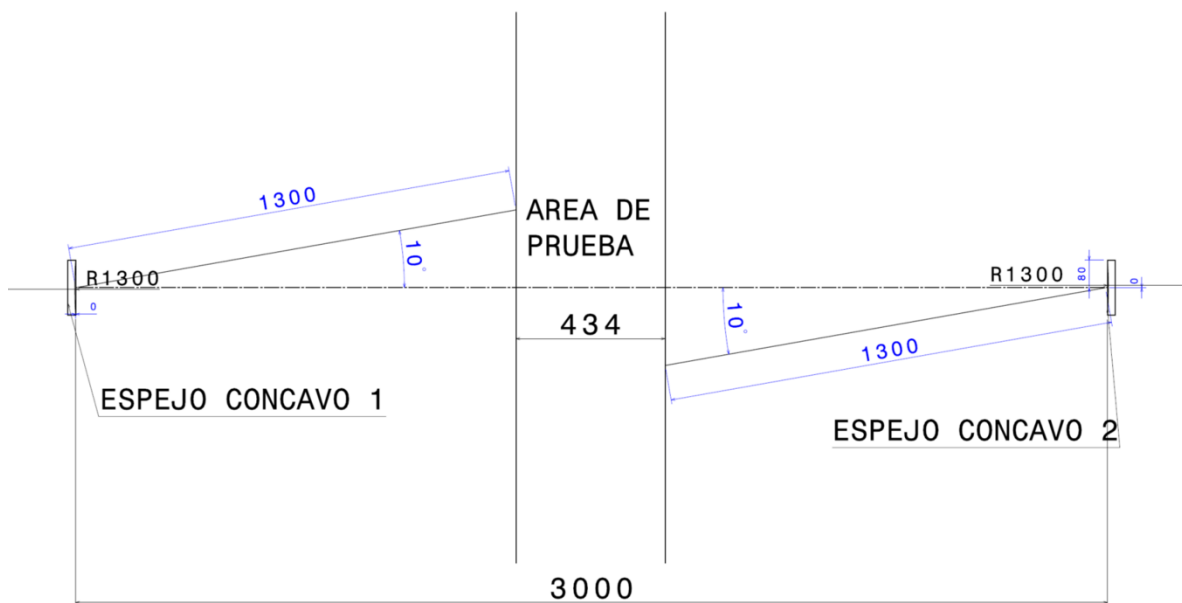


Imagen 1: montaje schlieren

- b. Calentar el perfil aerodinámico a una temperatura de 300°
- c. Introduzca el perfil aerodinámico en la zona de prueba del túnel aerodinámico y enciéndalo variando la velocidad de 1 mach a 8 mach.

3. OBTENCION DE RESULTADOS

- a. Descargue el material y compare las ondas visualizadas para cada velocidad.